

반복하중을 받는 철근콘크리트 골조 및 보강시스템의 내진성능 평가 및 개선

Improvement and Evaluation for Seismic Resistant Capacity of Reinforced Concrete Frame and Braced System under Load Reversals

김 광 연* 하 기 주** 신 중 학** 이 상 목*** 이 영 범*** 조 용 태***
Kim, Kwang Yeon Ha, Gee Joo Shin, Jong Hack Lee, Sang Mog Lee, Young Beom Cho, Yong Tae

ABSTRACT

Recently, it is required to improve the structural performance, such as durability and earthquake resistant capacity due to the deterioration of structural components in the existing reinforced concrete building with the old aging and transition of design code. Therefore, the new technology should be developed, such as seismic retrofit and improvement of structural performance in the existing reinforced concrete building.

This analytical study was performed to verify the effects of basic and reinforcing system in the reinforced concrete building. The analytical results by nonlinear finite element method were compared with the experimental results and the comparisons are judged to be good.

1. 서론

철근콘크리트 골조 및 벽체 시스템의 구조성능 평가는 그 대부분이 실험적인 연구¹⁾에 바탕을 두어 이루어지고 있으나 벽체 실험과 같은 큰 규모의 실험은 실험자체도 용이하지 않고 실험이 행하여진다 하여도 많은 설계변수를 다루기 힘든 것이 현 실정이다.

한편, 최근의 철근콘크리트 구조물의 유한요소해석은 컴퓨터의 개발과 많은 실험 데이터에 힘입어 콘크리트의 균열, 철근과 콘크리트의 부착, 콘크리트의 파괴형태 등과 같은 철근콘크리트 구조물의 비선형거동을 대부분 모델링 할 수 있게 되었다.

*정회원, 경운대학교 건축공학과 교수, 공학박사
**정회원, 경일대학교 건축공학과 교수, 공학박사
***정회원, 경일대학교 건축공학과 대학원 석사과정

본 연구에서는 철근콘크리트 골조 및 벽체에 있어서 브레이스등에 의한 보강방법의 설계변수가 구조적인 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험과 더불어 일본 치바대학의 野口연구실에서 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCFEM)²⁾을 사용한 해석을 수행하여 기존 건축물의 구조 성능 개선을 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석방법

2.1 해석모델의 개요

RCFEM은 2차원 평면응력상태로 해석이 가능하고, 다음에서 설명하는 콘크리트요소, 철근콘크리트 적층요소, 철근선재요소 및 부착요소 등의 주요 요소로 구성되어 있다.

2.1.1 콘크리트 요소

콘크리트 요소는 8절점의 선형변형도의 사각형요소를 사용한다. 이축응력하의 응력도-변형도 관계는 Darwin, Pecknold 등에 의한 등가일축변형도에 기본을 두는 직교 이방성 모델을 사용하여 압축하중의 경우, 보통 콘크리트에서는 그림 1과 같은 Saenz식에 의하며, 인장하중의 경우는 균열이 생길 때까지 선형탄성으로 한다. 파괴조건은 Kufer 등에 의한 실험에 입각하여 결정한다.

2.1.2 철근콘크리트 적층요소

철근콘크리트 적층요소는 그림 2와 같이 콘크리트요소와 철근요소가 절점을 공유하여 철근콘크리트의 특성을 모델화한 요소이다. 이 요소를 사용하면 철근요소와 철근절점을 큰 폭으로 줄일 수 있으며 철근이 요소내에 균일하게 분포되는 것으로 가정하므로 잔차력의 수렴계산 횟수를 줄일 수 있다.

2.1.3 철근선재요소

철근요소로는 2절점으로 이루어진 1차원의 선재요소를 사용한다. 기초모델의 응력도-변형도 곡선은 그림 3과 같이 이차선형(bi-linear) 모델로 근사화 하였으며 완전탄소성 모델을 사용하지만 수치계산상의 편의상 이차강성(E2)은 일차강성(E1)의 1/100로 가정하였다.

2.1.4 부착요소(Bond Link)

철근과 콘크리트간의 부착에는 부착요소를 사용한다. 부착요소는 철근절점과 콘크리트절점 사이에

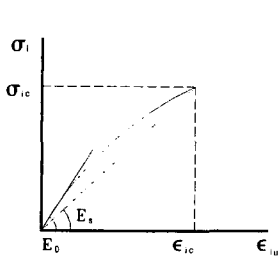


그림 1 Saenz식에 의한 $\sigma-\epsilon$ 곡선

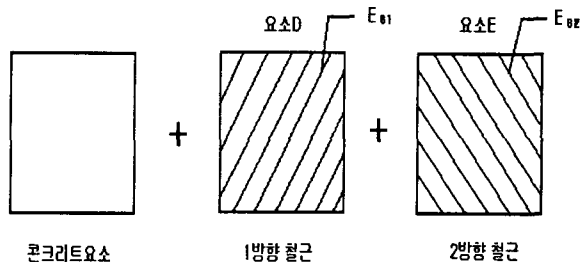


그림 2 철근콘크리트 적층요소

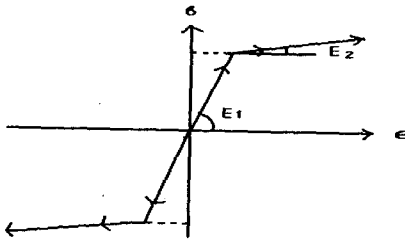


그림 3 선재요소의 응력도-변형도 관계

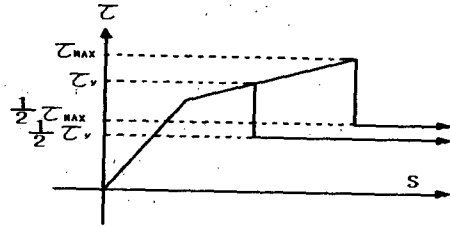


그림 4 최대주응력 도달후의 τ-s 곡선 모델화

배치되며, 철근축에 수평방향과 수직방향의 2개의 스프링으로 구성되어, 평행방향의 힘은 부착력, 수직 방향의 힘은 장부(dowel)작용에 대응한다. 철근 축방향의 스프링의 복원력 특성은 森田, 角에 의해 법칙화된 τ-s 포락선⁴⁾을 그림 4와 같이 수정하여 사용하였고, 철근 항복후에는 부착력을 반감시켜 나머지 힘은 해방시켰다.

2.2 해석대상 실험체 및 해석방법

2.2.1 해석대상 실험체

해석 대상으로는 여러 보강 실험체의 표준이 되는 철근콘크리트 골조 실험체(SRF)와 철근콘크리트 전단벽체 실험체(SRW) 및 X형 강재브레이스 보강 실험체(RFXBF)이다. 이들 실험체의 형상은 그림 5와 같고 배근상세와 사용재료의 성질 등의 자세한 사항은 참고문헌⁴⁾에 나타나 있다.

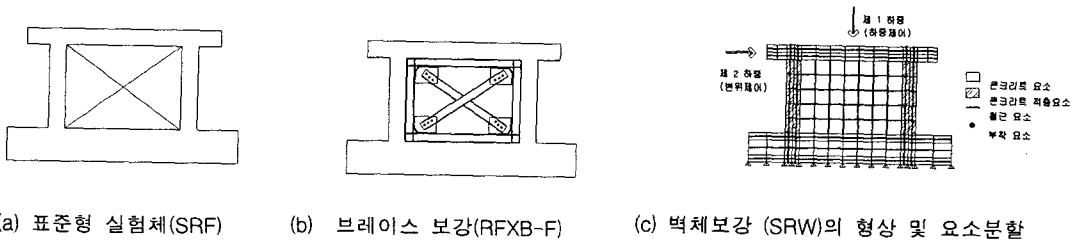


그림 5 해석대상 실험체의 형상 및 요소분할의 예

2.2.2 해석방법

그림 5의 (c)에 대표적으로 철근콘크리트 전단벽체 실험체의 요소분할과 경계조건을 나타내었다. 해석의 편의상 기둥의 전단보강근은 기본 골조 실험체와 같이 콘크리트 적층요소로서 표현하였으며 기초와 보의 주근 및 벽체의 보강근은 완전부착을 가정하여 콘크리트 절점의 번호를 그대로 사용하였고 기둥주근에만 부착요소를 고려하였다. 따라서 이 경우 총 411개의 절점으로 구성되고 콘크리트 요소는 130개, 철근요소는 174개, 부착요소는 기둥 주근에 44개를 사용하였다.

실험체의 경계조건은 실험에서와 같은 조건을 만족시키기 위하여, 먼저 기초 밑 부분을 고정단으로 하여 제1하중인 축력을 하중제어로 가한 후에 가력 보의 중간부분의 Y방향 변위를 구속한 뒤 가력보에 X방향으로 강제변위를 주는 변위제어로서 해석을 수행하였다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 하중-변위 관계 및 균열 패턴

실험체의 거동 및 응력, 변형 상태를 고찰하기 위하여 각 실험체의 해석에 의한 최대강도시의 변형도와 하중-변위 관계를 실험결과와 비교하여 분석하였다.

표준 철근콘크리트 골조 실험체(SRF)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도를 그림 6에 나타내었다. 표준 철근콘크리트 골조 실험체의 경우는 기둥 주근의 부착특성에 따른 영향을 비교하기 위하여 부착을 고려한 경우(SRF-B)와 완전부착을 가정한 경우(SRF-P)에 대하여 해석을 수행하였다. 유한요소 해석결과와 실험결과를 비교하면 초기강성이 실험값 보다 약간 크게 나타났다. 최대강도는 완전부착을 가정한 경우(SRF-P)는 해석값이 실험값 보다 약간 높게 나타났으나 기둥 주근의 부착을 고려한 경우(SRF-B)는 해석값이 실험값 보다 약간 낮게 나타났다. 한편 해석에 의한 실험체의 최대강도시의 변형도를 살펴보면 기둥 주두 및 주각부분에서 휨 균열이 다수 발생하여 실험결과와 동일한 양상을 보였다.

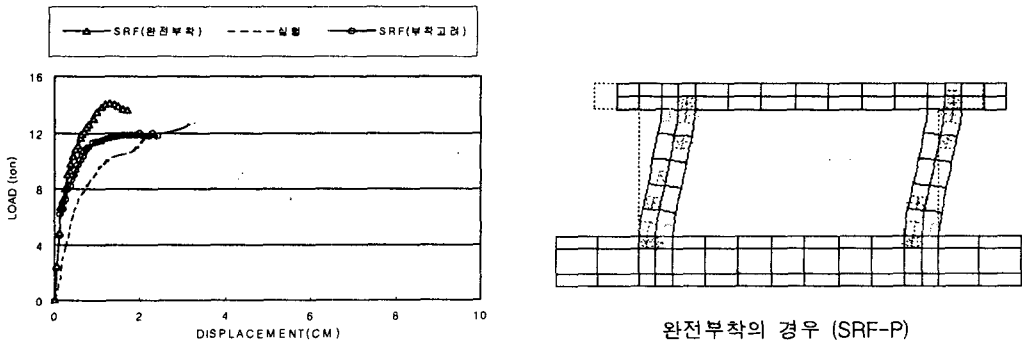


그림 6 표준 철근콘크리트 골조 실험체(SRF)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도

철근콘크리트 전단벽체 실험체(SRW)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도를 그림 7에 나타내었다. 유한요소 해석결과와 실험결과를 비교하면 초기강성이 실험값 보다 상당히 크게 나타났다. 최대강도 역시 해석값이 실험값 보다 약 27% 높게 나타났다. 한편 해석에 의한 실험체의 최대강도시의 변형도를 살펴보면 벽체 중앙부분에서 전단균열이 많이 발생하고 기둥의 경우는 벽체의 양 모서리 부분에서 벽체부분과 함께 휨 균열이 집중적으로 발생하고 있어 표준 철근콘크리트 골조 실험체와는 달리 양쪽 기둥과 벽체가 일체가 되어 거동하고 있음을 보여주었다. 또한 이와 같은 이유로 인하여 기둥 주근의 부착을 고려한 경우(SRW-B)와 완전부착으로 가정한 경우(SRW-P)는 해석상에서 거의 차이가 없었기 때문에 다음에서는 부착을 고려한 경우의 해석결과만을 분석하였다.

강재 브레이스 보강 실험체(RFXBF)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도를 그림 8에 나타내었다. 전술의 철근콘크리트 전단벽체 실험체의 해석결과를 토대로 기둥 주근의 부착을 고려한 경우만을 해석하였다. 유한요소 해석결과와 실험결과를 비교하면 철근콘크리트 전단벽체 실험체의 경우와 같이 초기강성이 실험값 보다 상당히 크게 나타났다. 최대강도는 해석값이 실험값 보다 약 11% 높게 나타났다.

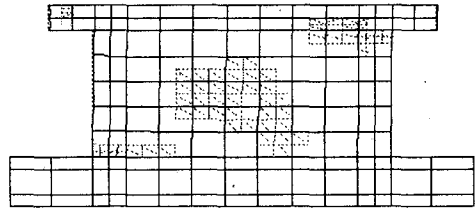
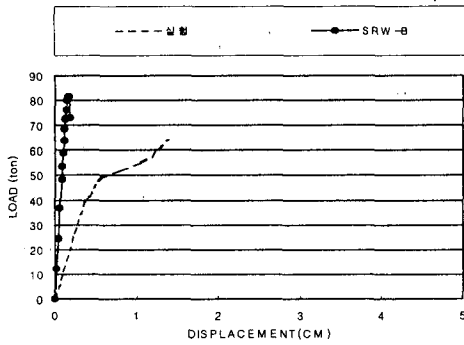


그림 7 철근콘크리트 전단벽체 실험체(SRW-B)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도

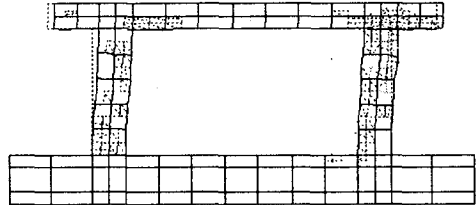
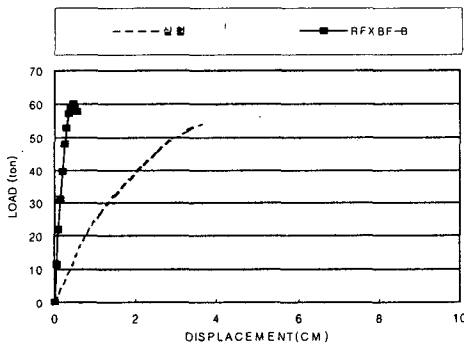


그림 8 강재 브레이스 보강 실험체(RFXBF-B)의 하중-변위 관계 및 최대강도시의 변형도

한편 해석에 의한 실험체의 최대강도시 콘크리트 요소의 변형도를 살펴보면 철근콘크리트 전단벽체 보강 실험체와는 달리 기둥에 균열이 다수 발생하였고 특히 우측 기둥에서 인장 브레이스와 만나는 주두부분과 가력보 부분의 손상이 현저함을 알 수 있었다.

3.2 최대강도

표 1에서 해석에 의한 실험체의 최대강도를 실험결과와 비교하였다. 최대강도는 표준 철근콘크리트 골조 실험체에서, 부착 특성을 고려하지 않을 경우는 해석값이 실험값 보다 약 11% 높게, 부착특성을 고려하였을 경우는 약 6% 낮게 나타났으며, 철근콘크리트 전단벽체 실험체의 경우는 부착특성을 고려하여도 해석값이 약 27% 높게 나타났다. 한편 강재 브레이스 보강 실험체의 경우는 해석값이 약 11% 높게 나타났다.

전반적으로 해석값이 실험값보다 높게 평가되고 있으나 이는 실제로는 3차원적인 구조물을 2차원적으로 해석하였기 때문으로 사료된다. 각 실험체의 최대강도를 표준 철근콘크리트 골조 실험체(SRF)의 최대강도로 실험과 해석에서 각각 기준화시켜 비교해보면, 철근콘크리트 전단벽체의 경우 실험에서 5.04배, 해석에서 5.79배의 강도를 나타내었으며 X형 강재 브레이스 보강 실험체의 경우는 모두 4.26배로 나타났다. 따라서 본 해석모델에 의하여 여러 가지 보강 시스템에 따른 각각의 구조성능의 평가 및 개선이 가능할 것으로 사료된다.

표 1 각 실험체의 최대강도의 비교

해석대상 실험체명	보강 시스템	실험의 최대강도 (ton)	해석의 최대강도 (ton)	$\frac{\text{해석값}}{\text{실험값}}$	$\frac{\text{실험값}}{\text{실험값(표준)}}$	$\frac{\text{해석값}}{\text{해석값(표준)}}$	비고
SRF-P	표준	12.7	14.1	1.11	1.00	1.00	완전부착
SRF-B			12.0	0.94		0.85	부착고려
SRW-B	전단벽체	64.0	81.6	1.27	5.04	5.79	부착고려
RFXBF-B	강재 브레이스	54.1	60.1	1.11	4.26	4.26	부착고려

4. 결론

철근콘크리트 골조 및 벽체에 있어서 브레이스등에 의한 보강방법의 설계변수가 구조적인 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험과 비선형 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중-변위 관계에 대한 유한요소 해석결과와 실험결과를 비교해 보면 표준 철근콘크리트 골조 실험체, 철근콘크리트 전단벽체 실험체, 강재 브레이스 보강 실험체 모두 초기강성 및 최대강도가 실험값 보다 약간 높게 나타났다. 이는 실제로는 3차원적인 구조물을 2차원적으로 해석하였기 때문으로 사료된다.
2. 각 실험체 최대강도를 표준 실험체 SRF의 최대강도로 실험과 해석에서 각각 기준화시켜 비교해 보면 철근콘크리트 전단벽체 실험체의 경우 표준실험체 보다 실험에서 5.04배, 해석에서 5.79배의 강도를 나타내었으며, X형 강재 브레이스 보강 실험체의 경우는 실험과 해석 모두 표준실험체 보다 4.26배의 강도를 나타내었다.
3. 각 실험체의 콘크리트 요소의 해석시 균열패턴을 살펴보면 각각의 보강 시스템에 따른 거동의 변화가 해석에서 충분히 표현되었고, 전술한 바와 같이 최대강도의 증가도 실험결과와 비슷한 경향을 보여, 본 해석모델에 의하여 여러가지 보강 시스템에 따른 각각의 구조성능의 평가 및 개선이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 건설교통부('99 건설기술연구개발사업)의 지원을 받아 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 하기주 외, "철근콘크리트 전단벽의 접합방식과 대각보강에 따른 내진성능 평가 및 개선", 한국구조물진단학회지, 1999. 7
2. 張 愛暉, "鐵筋コンクリート部材のせん斷舉動に關する非線形解析", 일본 치바대 박사학위 논문, 1991. 1
3. 森田 司郎, 角 徹三, "繰り返し荷重下における鐵筋とコンクリートの附着特性に關する研究", 일본건축학회 논문집 제229호, 1975. 3
4. 하기주, 신종학, 최민권, 이상목, 조용태, 이영범, "철근콘크리트 프레임의 내진보강을 위한 신기술 개발", 한국콘크리트 학회 / 추계 학술발표회 논문집 제12권 2호, 2000. 11